

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ
РАСТЯЖЕНИИ И КРУЧЕНИИ УПРОЧНЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

К. К. ПАХОТИН

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

Сопротивление упрочняющихся материалов растяжению на всем протяжении пластического деформирования вплоть до разрушения определяется по кривой течения «максимальное нормальное напряжение — наибольшее удлинение». Сопротивление этих же материалов сдвигу можно характеризовать кривой течения «максимальное касательное напряжение — истинный максимальный сдвиг», которая строится по результатам кручения сплошных круглых образцов.

В работе [1] было предложено в качестве критерия сопоставления различных процессов пластического формоизменения принять величину удельной работы пластической деформации при равных сдвигах.

При растяжении напряженное и деформированное состояния материала считаются однородными (во всяком случае до образования шейки). Удельная работа пластической деформации в этом случае определяется по площади диаграммы растяжения [2]:

$$\alpha = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon, \quad (1)$$

где

σ — истинное нормальное напряжение в определенный момент пластического деформирования,

ε — условное относительное удлинение.

Зная условное относительное удлинение на каждой стадии деформации, легко подсчитать величину истинного (логарифмического) сдвига на этой стадии

$$g = (3/2) \ln(1 + \varepsilon). \quad (2)$$

При кручении цилиндрического образца напряженное и деформированное состояния являются неоднородными по сечению образца, причем

$$\frac{\gamma}{\gamma_R} = \frac{\rho}{R}, \quad (3)$$

где

γ — сдвиг волокна, находящегося на расстоянии ρ от оси стержня.

История нагружения каждого элементарного объема с поперечным сечением dF такова, что описывается семейством параллельных кривых « τ — γ » с граничными кривыми BC (при $\rho = R$) и AD (при $\rho = r$), показанным на рис. 1.

Величина касательных напряжений в данный момент, когда сдвиг наружных волокон стержня равен γ_R , описывается кривой ДС.

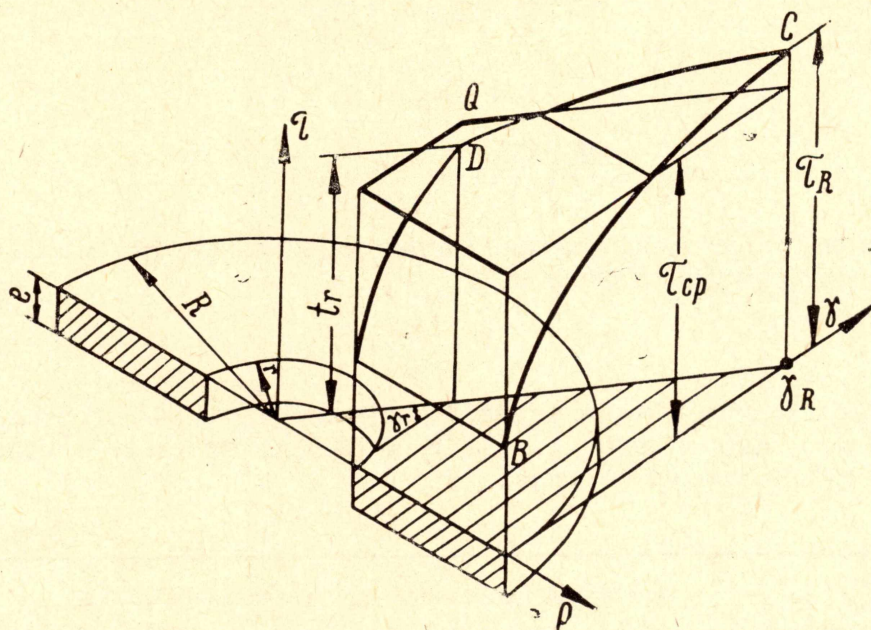


Рис. 1. Напряжения и деформации внутри круглого пустотелого образца при кручении

Считая напряженное и деформированное состояния однородными по длине образца l [2], работу dA , затраченную на пластическое деформирование элементарного объема dF длиной l , можно подсчитать

$$dA = \tau \gamma l dF. \quad (4)$$

Удельная работа, затраченная на пластическое деформирование единицы объема образца, выразится:

$$a = \frac{1}{Fl} \int_F \tau \gamma l dF$$

или

$$a = \frac{1}{F} \int_F \tau \gamma dF. \quad (5)$$

Для пустотелого образца с радиусами r и R , можно записать:

$$a = \frac{2R^2}{\gamma_R^2 (R^2 - r^2)} \int_{\gamma_r}^{\gamma_R} \tau \gamma^2 d\gamma$$

или

$$a = \frac{2 \gamma_R}{R (R^2 - r^2)} \int_r^R \tau \rho^2 d\rho. \quad (6)$$

Идеализируя материал, т. е. заменяя упрочняющийся материал идеально пластичным (плоскость Q на рис. 1), сопротивление сдвигу (τ_{cp}) можно определить

$$\tau_{cp} = \frac{3M}{2\pi R^3 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^3 \right]}. \quad (7)$$

Считая, таким образом, напряженное состояние однородным по сечению образца, вместо (6) запишем:

$$\alpha = \tau_{\text{ср}} \cdot \frac{2}{3} \gamma_R \left[1 + \frac{r^2}{R(R+r)} \right]$$

или

$$\alpha = \tau_{\text{ср}} \cdot \gamma_{\text{ср}}, \quad (8)$$

где

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{2}{3} \gamma_R \left[1 + \frac{r^2}{R(R+r)} \right]. \quad (9)$$

Истинный (логарифмический) сдвиг при кручении ($g_{\text{ср}}$) можно подсчитать по формуле Осипова В. Г. [3]

$$g_{\text{ср}} = 2 \ln \left(1 + \frac{\gamma_{\text{ср}}}{2} \right). \quad (10)$$

В табл. 1 приведены результаты растяжения сталей Р18, Р12, Р6М3, 2Х13, Ст3, латуни и меди. В табл. 2 приведены результаты испытания этих же материалов на кручение.

Таблица 1

Деформация ϵ	Истинные напряжения при растяжении, кг/мм ²						
	Р12	Р18	Р6М3	2х13	Ст3	латунь	медь
0,1	90,8	87,8	84,4	56,6	44,0	33,4	17,6
0,2	95,3	95,0	91,8	63,6	50,0	44,2	21,8
0,3	100,6	97,8	94,7	68,1	53,2	51,2	24,4
0,4	103,5	99,6	96,6	72,0	56,4	58,0	27,0
0,5	—	—	97,8	74,8	59,0	62,2	29,0
0,6	—	—	—	77,4	61,2	65,3	30,7
0,7	—	—	—	79,7	63,2	—	32,2
0,8	—	—	—	81,6	65,2	—	33,6
0,9	—	—	—	83,5	67,0	—	34,8
1,0	—	—	—	85,2	68,4	—	5,8

Приведенные в табл. 1 и 2 данные позволяют определить удельную работу пластической деформации по формуле (1) и при кручении по формуле (8). Зависимость удельных работ пластической деформации при растяжении от величины истинного (логарифмического) сдвига, определяемого по формуле (2), показана на рис. 2 светлыми кружками. Связь между удельными работами пластической деформации при кручении с величиной истинного (логарифмического) сдвига, определяемого по формуле (10), на рис. 2 показана косыми крестиками.

Сделанное сопоставление экспериментальных результатов по растяжению и по кручению ряда материалов, весьма существенно отличающихся по своим механическим свойствам, убеждает в надежности принятого критерия сопоставления на всех стадиях пластической деформации вплоть до разрушения для всех исследованных материалов. Наибольшее отклонение экспериментальных данных по растяжению от соответствующих данных по кручению имеет место у латуни, но и здесь это расхождение не превышает 3%.

Приняв кривую течения материалов в координатах «удельная работа пластической деформации — максимальный логарифмический сдвиг»

Таблица 2

Деформация $\gamma_{\text{ср}}$	Среднее по сечению касательное напряжение при кручении, кг/мм ²						
	P12	P18	P6M3	2x13	Ст3	латунь	медь
0,1	51,8	47,5	45,6	29,4	22,7	14,4	8,8
0,2	55,9	52,3	50,0	34,4	27,2	19,2	10,6
0,3	58,3	55,0	53,2	37,0	29,3	22,8	12,4
0,4	60,0	56,8	55,2	38,6	30,7	25,6	13,2
0,5	62,3	58,1	56,7	39,8	31,7	28,0	14,1
0,6	—	59,1	57,8	40,8	32,5	—	14,8
0,7	—	—	—	41,6	33,3	—	15,4
0,8	—	—	—	42,4	—	—	16,0
0,9	—	—	—	43,3	—	—	16,4
1,0	—	—	—	44,0	—	—	16,7

как единую для ряда процессов пластического формоизменения, легко рассчитать сопротивление кручению по диаграмме растяжения.

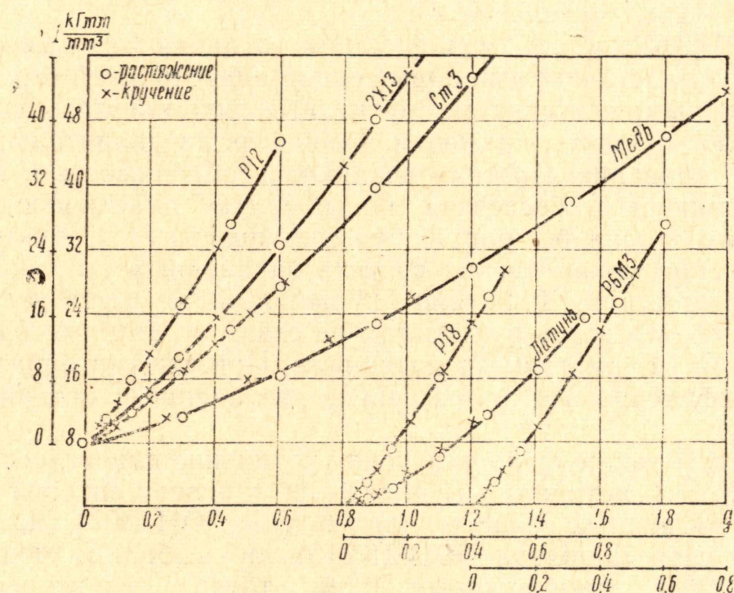


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных результатов по растяжению и по кручению различных материалов (по опытам автора)

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Седоков. Сопротивление материалов большим пластическим деформациям. Изд. ТГУ, Томск, 1966.
2. Н. А. Шапошников. Механические испытания металлов. Машгиз, М., 1954.
3. В. Г. Осипов. Об ошибке Надаи... Вестник инженеров и техников, № 1, 1950.